



NEW ENERGY FRONTIERS

II CONVEGNO INTERNAZIONALE SULL'ENERGIA



GAETA, 17 - 19 GIUGNO 2009

Il problema energetico è oggi uno dei temi più importanti che la ricerca scientifica e la politica si trovano ad affrontare ed a cui è necessario cercare di dare risposte possibili in tempi ormai brevi.

L'Italia può avere, in questo contesto, un ruolo di assoluta rilevanza potendosi avvalere delle conoscenze e delle capacità scientifiche di assoluta eccellenza offerte dalla sua Comunità universitaria e dai suoi Centri di ricerca.

Scopo del convegno è discutere le attività di ricerca svolte dalla comunità scientifica universitaria italiana delle "Macchine a Fluido" e "Sistemi per l'Energia e l'Ambiente" e dai maggiori Centri di ricerca nazionali sulle **celle a combustibile, idrogeno** e le **tecnologie per il controllo dei cambiamenti climatici**, in uno scenario a breve, medio e lungo termine.

Studio delle reazioni catalitiche in scala da laboratorio in ENEA

G. Monteleone , E. Calò, M. De Francesco, S. Galli, A. Giannini, V. Naticchioni *,R.Oronzio*, A. Pozio

ENEA CR Casaccia Dip. Tecnologie Energetiche – Via Anguillarese, 301 – 00123 - Roma, Italia
giulia.monteleone@casaccia.enea.it

**Università “La Sapienza” Roma, Dip. Ingegneria Chimica, via Eudossiana 18 - 00184 Roma*

SOMMARIO

Da diversi anni nel Dipartimento Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico dell'ENEA, vengono sviluppati progetti di ricerca che hanno favorito l'acquisizione di conoscenze e competenze sull'ingegneria delle reazioni chimiche.

Dette attività di R&D si sono inserite nel corso degli anni all'interno di settori specifici in funzione del progetto di ricerca in atto. In particolare le prime esperienze sull'argomento in questione sono nate insieme alle attività di R&D sulle celle a combustibile polimeriche, in quanto finalizzate allo sviluppo e dimostrazione di prototipi di generatori di idrogeno (*fuel processor*) per l'alimentazione delle celle stesse, rivolgendosi inizialmente ad applicazioni automobilistiche.

Dopo una prima fase in cui il combustibile di partenza è stato gas naturale, ci si è diretti verso la caratterizzazione di sistemi per la produzione di idrogeno a partire da combustibili convenzionali liquidi, integrati anch'essi con celle a combustibile polimeriche, per applicazioni questa volta di tipo stazionario.

Le prime esperienze dimostrative su prototipi hanno evidenziato la necessità di un accurato e metodico studio sperimentale dei processi catalitici a livello di miniscala per poter poi sviluppare il processo in dimensioni maggiori (*scale-up*). E' in questa fase che ci si è diretti verso lo studio sperimentale, con minireattori, dei meccanismi di reazione della catalisi eterogenea e degli aspetti tecnologici dei reattori a letto fisso, iniziando con la caratterizzazione delle reazioni di reforming.

Mantenendo l'approccio del "minireattore" ulteriori attività sono nate e sono attualmente in corso, nell'ambito della depurazione di biogas per utilizzo in celle a combustibile a carbonati fusi, dell'utilizzo di catalizzatori strutturati per il reforming del gas naturale e di metodi alternativi di produzione di idrogeno da idruri chimici.

Le attività sono in genere condotte nell'ambito di programmi nazionali o di specifici accordi di collaborazione sia con Università che con industrie del settore energetico.

Le strutture sperimentali e le competenze chimiche ed ingegneristiche presenti nei laboratori della Centro Ricerche della Casaccia, quali preparativa, caratterizzazione, prova ed analisi di campioni catalitici prima, di prototipi di reattore e sistemi di piccola e media dimensione poi, costituiscono un ambiente tecnico-scientifico idoneo a studiare processi chimici catalitici sia per il settore energetico che per quello ambientale.

La presente relazione offre un quadro degli studi, e risultati sperimentali, condotti sinora ed in corso (ossidazione parziale del gas naturale, prova di un fuel processor alimentato con GPL, caratterizzazione di catalizzatori per reforming del metano, prova di catalizzatori strutturati, desolfurazione mediante adsorbimento, idrogeno da idruri chimici).

Introduzione

Da quando esiste l'industria chimica, i catalizzatori hanno supportato il suo sviluppo, rimanendo comunque sempre in un secondo piano. Gli sforzi di ricerca in questo settore nella metà del secolo scorso hanno prodotto le conoscenze basilari e le tecnologie che sorreggono l'odierna industria chimica.

Negli ultimi anni, l'aumentato interesse verso fonti ed utilizzi alternativi dell'energia ed una pressione sempre più elevata sulla qualità ambientale, ha portato ad una nuova attenzione verso la ricerca e lo sviluppo di nuovi catalizzatori.

Si è osservato, infatti, da una parte un continuo e progressivo aumento delle richieste di combustibili più "puliti" per il trasporto con basso tenore di zolfo, a fronte di greggi sempre meno "dolci"; dall'altra una

estrema attenzione alle emissioni gassose di processi che emettono sostanze tossiche e/o inquinanti (ad es. SO₂, CO, NO_x).

Tali esigenze, affiancate alla prospettiva di un ampio uso di energia prodotta da celle a combustibile, che per il loro elevato rendimento termodinamico appaiono vantaggiose rispetto alle tradizionali sistemi di conversione energetica, hanno favorito una serie di ambiziose ricerche nel settore della catalisi e della reattoristica chimica, con l'ingresso di una nuova generazione di ricercatori in questo settore.

L'elevata qualità dei gas richiesti (si pensi ad esempio al basso tenore di ossido di carbonio accettabile nell'alimentazione anodica di una cella a combustibile polimerica) e le dimensioni ridotte e compatte di nuove tecnologie hanno portato ad approcci e soluzioni sofisticate, sia nella formulazione

dei catalizzatori che nello sviluppo dei sistemi di reazione.

L'approccio di ricerca seguito in generale su questi argomenti, in ENEA, come pure in molte altre strutture di ricerca, ha prediletto l'immediata ed ovvia via di cercare inizialmente di adeguare materiali e prodotti commerciali, sino ad allora utilizzati nell'industria petrolchimica, alla piccola scala delle nuove applicazioni. In particolare, guardando ai progetti che ha visto coinvolta l'ENEA, ci si riferisce ai processi catalitici per la produzione di idrogeno da alimentare in cella a combustibile (cioè reforming di combustibili fossili, water gas shift, ossidazione selettiva).

Oltretutto la produzione industriale di idrogeno continua ad essere quanto mai di interesse, vista la notevole richiesta, attuale e futura, di questo gas in raffineria, sia per la desolforazione che per la produzione di syngas. A riguardo, a fronte di una previsione di crescita della domanda di catalizzatori nel mondo del 6% per il 2012, i maggiori produttori di catalizzatori (Alberarle, BASF, Grace Division, Haldor Topsoe, Johnson Matthey, Sud-Chemie e UOP) affermano che la maggior parte della R&D è attualmente focalizzata proprio sui catalizzatori per la produzione di gas di sintesi [1].

I primi risultati ottenuti seguendo l'approccio indicato, pur se utili per individuare le soluzioni ingegneristiche di questo estremo scale-down, hanno d'altra parte messo in evidenza l'inadeguatezza dei materiali catalitici (per dimensioni e a volte per composizione) e l'ovvia non economicità dell'operazione, contraria alla storia stessa dell'industria chimica, che vede il proprio sviluppo proprio nell'aumento della scala degli impianti.

Ne è scaturito dunque un ripensamento sull'approccio più adeguato da seguire, ribadendo la necessità di procedere per gradi, partendo dallo studio sui materiali catalitici, appunto in scala da laboratorio.

Tale evoluzione si è prodotta anche nei laboratori in ENEA, dove le competenze e le strutture sperimentali di stampo ingegneristico sono state integrate, nel tempo, con quelle tipicamente chimiche. Gli argomenti di ricerca si sono integrati ed ampliati, ricreando una collaborazione tra scienza e tecnologia, già fruttuosa, storicamente, nel passato. Per tradizione i processi più studiati rimangono quelli della produzione catalitica di idrogeno, sia a partire da combustibile fossile che da idruri chimici, anche se le competenze tecnico-scientifiche, le apparecchiature di prova ed analisi, gli apparati sperimentali da banco e per prototipi, risultano adeguati per uno spettro ben più ampio di processi.

Fuel Processing di Idrocarburi

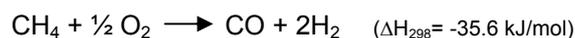
A partire dagli anni '90, la produzione di idrogeno, fino a quel momento presente quasi esclusivamente nell'industria petrolchimica, cominciò a suscitare interesse per l'alimentazione delle celle a combustibile, per applicazioni sia automobilistiche che stazionarie. Anche l'ENEA iniziò ad occuparsene in quegli anni, conducendo, in cooperazione con il CNR-TAE [2] attività di ricerca su processi di conversione del gas naturale in idrogeno, sviluppando un impianto sperimentale (Methane Partial Oxidation), con capacità di circa 5 Nm³/h di H₂ prodotto, equivalenti a circa 5 kW in termini di potenza elettrica ottenibile con l'alimentazione di una cella a combustibile ad elettrolita polimerico (campo di applicazione tipico della fornitura di potenza elettrica ausiliaria di un autoveicolo).

In fig. 1 è riportata un'immagine dell'impianto sperimentale di prova.



Fig. 1 – Impianto MEPOX (MEthane Partial Oxidation)

L'impianto MEPOX si compone di una sezione di desolforazione a carboni attivi a temperatura ambiente, a cui segue un reattore di ossidazione parziale catalitica del CH₄, dove avviene la reazione:



Successivamente sono inserite due sezioni di conversione del CO a CO₂ (reazione di SHIFT), il primo ad alta temperatura ed il secondo a bassa temperatura. Ed infine una sezione di ossidazione selettiva per convertire il CO rimasto a CO₂ ed ottenere dunque in uscita dall'impianto una corrente ricca in idrogeno con un contenuto di CO < 10 ppm idonea ad alimentare una cella a combustibile polimerica.

In quel progetto tutta l'ingegneria del processo è stata sviluppata interamente all'interno dei laboratori dell'ENEA Casaccia, mentre i catalizzatori utilizzati sono stati di tipo commerciale, tradizionalmente utilizzati nell'industria petrolchimica.

Malgrado le buone prestazioni rilevate durante le prime fasi di funzionamento del reattore di ossidazione parziale, i catalizzatori commerciali, nell'industria petrolchimica utilizzati per la reazione di *Steam Reforming*, alla lunga si sono dimostrati non adeguati alle più severe condizioni di esercizio dell'ossidazione parziale e delle ripetute operazioni di start-up e shut-down richieste dall'applicazione per autotrazione.

Ma uno studio più attento dei fenomeni catalitici e dell'andamento della reazione chimica non è stato reso possibile durante tale esperienza principalmente per la complessità della gestione dell'impianto sperimentale e per la sua dimensione (tempi e costi di ogni avviamento elevati, difficoltà nella carica e scarica del catalizzatore...), evidenziando la necessità di una fase preliminare di studio e caratterizzazione dei catalizzatori nelle condizioni operative del processo, prima del passaggio alla scala di prototipo.

Le difficoltà tecnologiche riscontrate per la produzione di idrogeno a bordo, a partire da combustibili fossili, ha indotto ad un generale ripensamento sulle attività di ricerca da finanziare (la stessa posizione è stata presa dall'AICHE's negli USA sulle attività di ricerca sul "fuel processor on-board" [3]).

Nell'ottica di tale posizione la produzione di idrogeno da idrocarburi è stata ed è considerata un'applicazione possibile solo per sistemi cogenerativi stazionari di piccola e media potenza.

In tale contesto si inserisce l'attività di ricerca del programma FISR finanziato dal MIUR per il periodo 2005-2009, sul tema "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni" che prevede la caratterizzazione di un Fuel Processor a GPL.

Il sistema oggetto della sperimentazione è rivolto alla generazione stazionaria di energia elettrica su piccola scala ed è stato progettato per ottenere una produzione nominale di idrogeno pari a circa 1 Nm³

h⁻¹, tale da alimentare una cella a combustibile di tipo PEM (Polymer Electrolyte) da 1 kWe.

La scelta del GPL come gas di alimentazione è da ricercarsi sia nella sua economicità, che nella sua facile reperibilità, accumulo e trasporto.

Il fuel processor (APS1000) è stato progettato e realizzato dalla società greca HELBIO SA (spin off dell'Università di Salonicco), ed accoppiato con uno stack di 32 monocelle, realizzato da Exergy Fuel Cell. Il ruolo dell'ENEA è quello di testare e caratterizzare sperimentalmente il sistema di cogenerazione completo. Con l'obiettivo di verificare il rispetto delle specifiche richieste e di ottimizzarne i parametri operativi..

Studio dei catalizzatori di reforming su microreattori

Le esperienze condotte su impianti "prototipo", di fuel processing, avevano dimostrato la difficoltà di studiare in maniera accurata i fenomeni catalitici come pure il comportamento delle reazioni catalitiche a causa principalmente delle dimensioni e del fatto che nell'impianto fossero integrati tutti gli stadi di trattamento del combustibile (purificazione, reforming, shift). Si è cercato quindi di individuare una scala idonea e significativa per la sperimentazione dei catalizzatori e delle relative apparecchiature e contemporaneamente si è creata una collaborazione organica con le competenze chimiche per lo studio dei fenomeni catalitici.

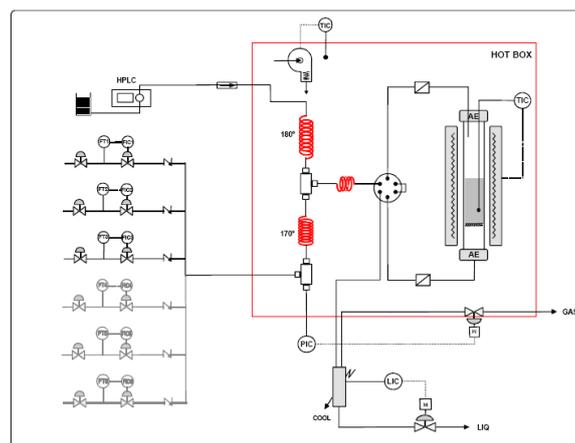


Fig. 21 – Schema Apparato Sperimentale

In fig. 2 è riportato lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato per lo studio delle reazioni chimiche. Il cuore del sistema è costituito da un reattore tubolare a letto fisso dal diametro interno di circa 10 mm, realizzato in Hastelloy L. L'apparato sperimentale si completa con due sistemi (microGC Varian, ABB Advance Optima) per l'analisi della composizione dei gas reagenti e prodotti

L'approccio di uno studio su microscala è stato quindi applicato ad alcuni processi e tecnologie afferenti sempre il settore delle celle a combustibile.

In particolare, nell'ambito dell' Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico – ENEA, "Tema di ricerca 5.2.5.11 Celle a combustibile per Applicazioni Stazionarie Cogenerative", è stata condotta un'attività di *Sviluppo ed ottimizzazione di sistemi di fuel processing*, che si è occupata della caratterizzazione delle reazioni di riforma del combustibile e della sintesi e caratterizzazione di nuovi catalizzatori.

All'interno di tale programma è stata studiata l'ossidazione parziale del metano su varie tipologie di catalizzatori metallici. In particolare sono stati provati sperimentalmente catalizzatori con diversa granulometria (pelletes e polveri), contenenti specie attive differenti (Ni, Pt) e con diverso supporto (Al_2O_3 e CeO_2).

E' stata osservata l'influenza delle condizioni di reazione, in particolare del rapporto O_2/CH_4 e della GHSV, definita come il rapporto tra la portata volumetrica a condizioni standard ed il volume totale del catalizzatore.

Sono stati studiati gli effetti di questi parametri sull'attività, la stabilità e la disattivazione del catalizzatore come conseguenza anche della formazione di carbone.

In questo studio sono stati caratterizzati un catalizzatore commerciale della British Gas (oggi Jhonson Matthey), ed alcuni catalizzatori sintetizzati e forniti dall'Università degli Studi di Salerno, dipartimento di Ingegneria Chimica ed Alimentare, nell'ambito accordo di Programma MSE-ENEA. In particolare con l'obiettivo di essere resistenti alle elevate temperature, all'avvelenamento ad opera di composti solforati ed alla disattivazione per effetto di composti carboniosi [4].

Studio della desolforazione del biogas

Le prime esperienze condotte in scala laboratorio grazie alla flessibilità e semplicità di gestione degli apparati sperimentali, hanno permesso di svolgere in parallelo attività di ricerca su argomenti diversi tra di loro, sebbene le competenze richieste per farlo fossero le stesse. In particolare ci si riferisce allo studio e sviluppo di un sistema di clean-up per biogas prodotto da digestione anaerobica di reflui zootecnici. Anche tale attività di ricerca come quella dedicata ai catalizzatori di reforming, rientra nell'ambito dell' "Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico – ENEA, Tema di ricerca 5.2.5.11 Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative", prevedendo come obiettivo finale l'accoppiamento del sistema di gestore/clean-up con una cella a combustibile a carbonati fusi.

I maggiori inquinanti per una cella a carbonati fusi, presenti in un biogas da zootecnia, sono i composti dello zolfo. Come è noto, per la desolforazione dei

combustibili gassosi sono stati sviluppati industrialmente, da tempo, diversi processi basati su meccanismi come assorbimento, adsorbimento, separazione con uso di membrane, separazione criogenica e/o conversione chimica. L'adsorbimento risulta essere la tecnologia più adatta nei sistemi a celle a combustibile per raggiungere concentrazioni molto basse di zolfo (< 1 ppm H_2S).

L'attività di ricerca è stata allora impostata prevedendo una prima fase di caratterizzazione di materiali commercialmente noti per l'adsorbimento di H_2S , quali carboni attivi, carboni attivi impregnati, zeoliti, ossidi metallici, adottando alcune tipiche tecniche di indagine (Porosimetria, Diffrazione dei raggi x, Analisi chimica elementare o fluorescenza ai raggi x, Analisi termogravimetrica, TPR/TPD/TPO, SEM.)

Tale caratterizzazione consente di individuare la classe di materiale più idoneo all'abbattimento spinto dell' H_2S per procedere poi alla sintesi di un campione specifico per l'applicazione richiesta.

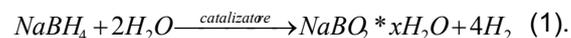
Come è evidente in attività sperimentali la presenza di composti dello zolfo comporta l'utilizzo di materiali idonei. La flessibilità, la dimensione, la semplicità dell'apparato sperimentale cui si accennava precedentemente ha consentito di adeguare rapidamente i componenti utilizzati (ad esempio il reattore è stato realizzato in quarzo anziché in acciaio o altre leghe metalliche)

Idrolisi catalitica del $NaBH_4$

In ENEA, da tempo, sono in corso studi e progetti per una produzione di idrogeno alternativa a quella da combustibili fossili e vari gruppi di ricerca si sono dedicati all'utilizzo di idruri chimici per applicazioni mobili e portatili con celle a combustibile [4].

Gli idruri chimici rappresentano un vettore sicuro e compatto, per l'accumulo, il trasporto e la produzione *on-demand* di idrogeno puro.

Le attività sperimentali si sono indirizzate in particolare sull'idrolisi catalitica del sodioboroidruro ($NaBH_4$):



La reazione è esotermica ($\Delta H=300KJ/mole$) ed ha come prodotti idrogeno gassoso umido (H_2) e metaborato di sodio ($NaBO_2$) [5].

La reazione procede all'inizio spontaneamente ma è subito bloccata dall'ambiente alcalino dei prodotti di reazione. Per far procedere la reazione è allora necessario utilizzare un catalizzatore metallico (Co, Ru, Ni) [6].

La reazione di idrolisi del sodioboroidruro (1) può essere condotta in fase solido, inviando sul sodioboroidruro in polvere delle piccole quantità di acqua (con il catalizzatore in fase solido o liquida),

oppure in una soluzione acquosa dell'idruro, mettendola in contatto con il catalizzatore, Per impedire una produzione non controllata, la soluzione è in genere stabilizzata con l'aggiunta di un idrossido (NaOH, KOH), che ne aumenta il pH, e inibisce la produzione di H_2 .

Nei laboratori ENEA ci si è focalizzati dapprima sulla catalisi della reazione di idrolisi in fase acquosa, che ha portato allo sviluppo di un innovativo sistema di reattore, capace di trattenere magneticamente il catalizzatore (fig. 3).



Figura 3: Reattore catalitico per la reazione di idrolisi del $NaBH_4$

Il reattore è stato quindi inserito in un prototipo di generatore di idrogeno (fig.4), completo di accumulo della soluzione e pompa di circolazione della soluzione.

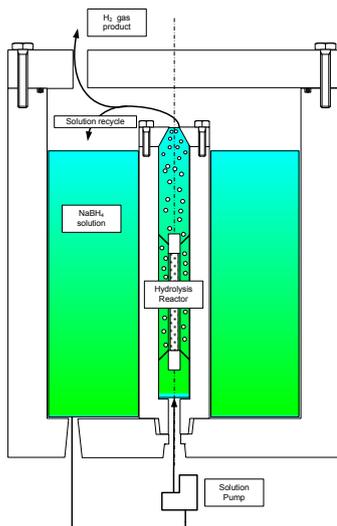


Figura 4: Generatore di idrogeno con idrolisi del $NaBH_4$

La soluzione di sodioboroidruro, accumulata nel serbatoio esterno, è fatta fluire dalla pompa nel reattore posto al centro del serbatoio, dove la stessa

entra in contatto con il catalizzatore, producendo idrogeno.

Il prototipo di generatore, in corso di sperimentazione, è stato progettato per garantire l'alimentazione, anche non continua, di una cella a combustibile polimerica da 50 W, per circa 24 ore.

Conclusioni

Le diverse esperienze di R&D condotte a partire dagli anni '90, hanno permesso la crescita in ENEA di competenze sia chimiche che ingegneristiche in grado di studiare e sviluppare un processo chimico catalitico nella sua interezza, partendo dal livello più basilare dello studio dei meccanismi catalitici, passando attraverso il livello intermedio che studia il catalizzatore accoppiato al reattore catalitico da laboratorio, per arrivare, con lo scale-up, alla realizzazione del processo e al prototipo nella sua integrità.

Tali competenze di *reaction engineering* [7] hanno dimostrato nel corso di vari progetti l'importanza di affrontare ogni argomento partendo dalla piccola scala per studiare i fenomeni e raccogliere informazioni fondamentali per il successivo scale-up. In particolare lavorando sul piccolo è possibile caratterizzare diversi materiali e preparative per una stessa reazione chimica; sempre su piccola scala, le condizioni di lavoro possono essere portate in condizioni estreme, verificandone gli effetti sui materiali selezionati come catalizzatori. In tal modo i tempi ed i costi possono essere notevolmente ridotti.

Attualmente l'ENEA è in grado di garantire l'approccio appena descritto in diversi settori di attività, grazie alle competenze sviluppate, alle strutture sperimentali acquisite, all'ottima integrazione raggiunta tra strutture e competenze tipicamente di stampo ingegneristico con quelle tipicamente chimiche.

Ovviamente questo può costituire un elemento importante ma non sufficiente ad una rete di collaborazione che vede, oltre che nelle Università, l'Industria quale motore trainante per l'innovazione ed il successo di qualsiasi progetto tecnologico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] R. Coons, "Catalysts: Seeking the Next Big Thing". Chemical Week, may 4, 2009,
- [2] Recupero V. et alii, " Fuel Cell Electric vehicles. An Italian Project to develop a hydrogen generator". 12th World Hydrogen Energy Conference, 1998
- [3] "Are fuel cell appropriate for cars and trucks?". AIChE's Government Relations Committee, 2003
- [4] Z.T. Xia, S.H. Chan, "Feasibility study of hydrogen generation from sodium borohydride solution for micro fuel cell applications". Journal of Power Sources , (2005); 152:46–49
- [5] Q. Zhang, G. Smith, Y. Wu, R. Mohring, "Catalytic hydrolysis of sodium borohydride in an auto-thermal fixed-bed reactor" . International Journal of Hydrogen Energy, (2006); 31: 961–965
- [6] S.C. Amendola, S.L. Sharp-Goldman, M.S. Janjua, N.C. Spencer, M.T. Kelly, P.J. Petillo, M. Binder, "A safe, portable, hydrogen gas generator using aqueous borohydride solution and Ru catalyst" . International Journal of Hydrogen Energy, (2000); 25: 969–975

[7] Jacob A. Moulijn et Al., "Catalysis Engineering on Three Levels". International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol.1 2003,

Abstract

In past years the Energy Technologies Department of ENEA (the Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment) has been involved in research projects aimed to acquire knowledge and expertise in chemical reaction engineering. Early activities on reaction engineering were carried out mainly within the RD&D national programmes about the development of various fuel cells technologies (polymer fuel cell, molten carbonate fuel cell, phosphoric acid fuel cell). The scope was always to develop or/and demonstrate the conversion (reforming) of a hydrocarbon fuel stream to a hydrogen mixture to be supplied to the anodic side of a fuel cell (fuel processing).

After early experimental studies focused on the development of a natural gas fuel processor for automotive applications, activities were addressed to the characterization of fuel-cell energy systems for the small stationary production of hydrogen from conventional fuels liquids.

Those experiences at the prototypes scale put in evidence the need for a throughout and methodical understanding of the catalytic processes at the micro- (molecular level) and meso-scale (transport-kinetic events on a catalyst-particle level) before arriving at the eventual macro-scale (reactor design in context of process and plant design). The activities were then redirected to the experimental studies of the reaction mechanisms of the reforming heterogeneous catalysis by using a mini-reactor system.

Following this approach of mini-scale studies, further research activities have been started and now in progress always in the hydrogen and fuel cell technology projects (i.e. gas purification, structured catalysts, chemical hydrides hydrolysis).

All these activities are carried out in cooperation with Universities and energy industries. The interdisciplinary group of chemistry and engineering competences and the related facilities and laboratories for material characterization, testing and analysis, and component and energy system testing are located at the ENEA Casaccia research centre.

This report provides an overview of activities and their experimental results carried out to date and in progress.